

Dinâmica espaço-temporal da expansão de pivôs centrais e da diversificação agrícola no município de Casa Branca (SP)

DOI: 10.20396/labore.v18i00.8674282

Chamada L&E Monitoramento, relato e verificação da agricultura de baixa emissão de carbono em processos de uso e cobertura da terra

Taya Cristo Parreiras

<https://orcid.org/0000-0003-2621-7745>

Universidade Estadual de Campinas / Campinas [SP] Brasil

Édson Luis Bolfe

<https://orcid.org/0000-0001-7777-2445>

Embrapa Agricultura Digital / Campinas [SP] Brasil

Edson Eyji Sano

<https://orcid.org/0000-0001-5760-556X>

Embrapa Cerrados / Planaltina [DF] Brasil

Lucas Augusto Pereira da Silva

<https://orcid.org/0000-0001-5504-9029>

Universidade Federal de Uberlândia / Uberlândia [MG] Brasil

RESUMO

Este trabalho teve, como objetivo, avaliar a forte expansão de sistemas de irrigação por pivôs centrais (SIPCs) no município paulista de Casa Branca, entre 1985 e 2019, por meio da análise da dinâmica espaço-temporal da produção agrícola, além dos possíveis impactos ambientais e do papel do sensoriamento remoto no seu monitoramento. Neste período, Casa Branca tornou-se o segundo município do Brasil com maior área relativa ocupada por SIPCs, consolidando-se como o mais relevante dentre os municípios do Polo Nacional de Irrigação Vertentes do Rio Pardo e Mogi-Guaçu (PRPMG). A expansão dos SIPCs ocorreu sobre áreas anteriormente ocupadas por lavouras de sequeiro e pastagens, sem supressão da vegetação nativa. Houve aumento expressivo da produção e no portfólio de lavouras temporárias, desconcentração das terras, com aumento no número de estabelecimentos rurais de menor área, e consolidação de Casa Branca como um município de agricultura de elevada diversificação. No entanto, o município também é o maior usuário de recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo. Considerando-se os impactos ambientais associados à prática intensiva da irrigação, com implicações diretas nas mudanças climáticas, o monitoramento da sua dinâmica agrícola é crucial para a sustentabilidade ambiental e econômica. Nesse sentido, estudos mostraram que o sensoriamento remoto, ao aliar imagens de satélite a técnicas de aprendizado de máquina ou aprendizado profundo, é uma ferramenta adequada para detecção e mapeamento da dinâmica de sistemas irrigados de produção, beneficiando estratégias de monitoramento de práticas agrícolas que visam maior eficiência e sustentabilidade na agricultura, tais como as de Mensuração, Reportagem/Relato e Verificação (MRV).

PALAVRAS-CHAVE

Irrigação. Sensoriamento Remoto. Cerrado. Monitoramento Agrícola.

Space-time dynamics of the expansion of irrigated areas and agricultural diversification in Casa Branca [state of Sao Paulo] Brazil

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the expansion of center pivot irrigation systems (SIPCs) in the São Paulo municipality of Casa Branca, between 1985 and 2019, through the analysis of the space-time dynamics of agricultural production, in addition to the possible impacts on environments and the role of remote sensing in their monitoring. During this period, Casa Branca became the second municipality in Brazil with the largest relative area occupied by SIPCs, consolidating itself as the most relevant player from the National Pole of Irrigation Hillside of Rio Pardo and Mogi-Guaçu (PRPMG). The expansion of the SIPCs, over 13,000 hectares, took place over areas previously occupied by rainfed crops and pastures without removing native vegetation. There was a significant increase in production and portfolio of temporary crops, deconcentration of land with smaller rural establishments, and the consolidation of Casa Branca as a highly diversified agricultural municipality. However, it is also the largest user of water resources in the Pardo River Basin. Considering the environmental impacts associated with intensive irrigation, with direct implications for climate change, monitoring its agricultural dynamics is crucial for environmental and economic sustainability. In this sense, studies have shown that remote sensing by combining satellite images of medium spatial and temporal resolution with machine learning or deep learning techniques, is an adequate tool for detecting and mapping the dynamics of irrigated production systems, benefiting strategies of monitoring agricultural practices aimed at greater efficiency and sustainability in agriculture such as Measurement, Reporting/Reporting and Verification (MRV).

KEYWORDS

Irrigation, Remote Sensing, Cerrado, Agricultural Monitoring.

1. Introdução

A agricultura irrigada é a atividade que mais demanda recursos hídricos no Brasil. Os sistemas de irrigação por pivô central (SIPCs) se tornaram uma importante estratégia para modernização da agricultura, pois permitem aumento na produtividade e regularização da oferta de alimentos. Os SIPCs foram desenvolvidos nos Estados Unidos entre as décadas de 1940 e 1950 e foram inicialmente introduzidos no estado de São Paulo no final da década de 1970 (ANA, 2021). Esse sistema de irrigação é o mais utilizado no Brasil, principalmente no Cerrado, onde se concentra 73% da área total ocupada por esses equipamentos (ANA, 2021).

Impulsionados por iniciativas governamentais como o Programa de Irrigação do Nordeste (PROINE), o Programa de Financiamento de Equipamentos de Irrigação (PROFIR) e o Programa Nacional de Irrigação (PRONI), os produtores passaram a investir nos SIPCs por propiciarem alta eficiência no uso da água, isto é, menores perdas (~15%), aumento expressivo de produtividade e renda, redução de custos de produção, regularização da oferta e modernização do sistema de produção (Landau & Guimarães, 2014; ANA, 2021).

Com base na densidade de ocupação, na área total irrigada e no crescimento observado e potencial, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2021) identificou e delimitou 26 Polos Nacionais da Agricultura Irrigada no Brasil, os quais são considerados áreas especiais para gestão dos recursos hídricos. Estes polos são regiões geográficas onde a irrigação desempenha um papel significativo na produção agrícola, contribuindo para aumentar a produtividade e a segurança alimentar. Dentre estes, existem 15 polos nacionais considerados os motores de expansão da agricultura irrigada no país, onde o calendário de plantio e colheita é altamente dinâmico, com produção em até 3 safras anuais, sendo que 12 destes estão localizados no Cerrado (ANA, 2021).

Além da produtividade, os SIPCs podem promover a diversificação do ambiente agrícola, tendo em vista que a automatização e a aplicação racionalizada da água permitem a produção de diversas lavouras, como grãos, olerícolas, fruticultura, cana-de-açúcar, café, entre outras, em até três safras anuais, inclusive no inverno, propiciando, também, o cultivo de mais de uma cultura simultaneamente no mesmo pivô (ANA, 2021). Por outro lado, existem diversos impactos ambientais associados à tecnologia, consumo excessivo de água, emissão de gases de efeito estufa, supressão da vegetação natural para abertura de novas áreas agrícolas, além da contaminação dos cursos hídricos com fertilizantes e defensivos aplicados junto à irrigação (Maraseni & Cockfield, 2012; Cardozo et al., 2016; Angnes et al., 2023). Nesse sentido, o monitoramento das áreas agrícolas irrigadas é fundamental do ponto de vista da segurança alimentar, da economia e da conservação ambiental.

Este estudo objetiva analisar os impactos da expansão de sistemas de irrigação por pivô central na dinâmica da produção agrícola e da paisagem no município de Casa Branca, por meio de dados censitários, mapeamentos oficiais e informações de campo. Este município, de elevada ocorrência de SIPCs, faz parte do polo nacional de irrigação Vertentes do Rio Pardo e Mogi Guaçu (PRPMG), que abrange municípios dos estados de Minas Gerais e, principalmente, São Paulo, em região de transição de Cerrado e Mata Atlântica. Pretende-se, também, compreender o papel do município no contexto da agricultura irrigada, tanto do ponto de vista local, quanto regional e nacional. Por fim, amplia-se a discussão para o papel do sensoriamento remoto no monitoramento desse tipo de sistema de produção.

2. Material e métodos

2.1. ÁREA DE ESTUDO

O município paulista de Casa Branca localiza-se na mesorregião de Campinas e microrregião de São João da Boa Vista (Figura 1), possui uma área de 864 km² e uma população de 28.083 habitantes (IBGE, 2023). Encontra-se em região de ecótono Cerrado (45,5%) e Mata Atlântica (54,5%), e o clima predominante é o subtropical úmido (Cwa), com invernos secos e verões quentes, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (Alvares et al., 2013).

A compartimentação fisiográfica do município foi realizada por Amaral et al. (2015), que dividiu o município em seis unidades fisiográficas, considerando informações de geologia, geomorfologia, relevo, solos e declividade. A unidade mais representativa, onde há predomínio de agricultura irrigada no município, é denominada “areias e cascalheiras em relevos de morros e encostas suavizadas”. Essa unidade, pertence à Formação Pirassununga (Terciário), que apresenta ambientes com altitudes variando de 600 a 800 metros, com relevo suave a ondulado, apresentando alta susceptibilidade à erosão nas áreas com maior energia (mais elevadas) (Reis et al., 2018).

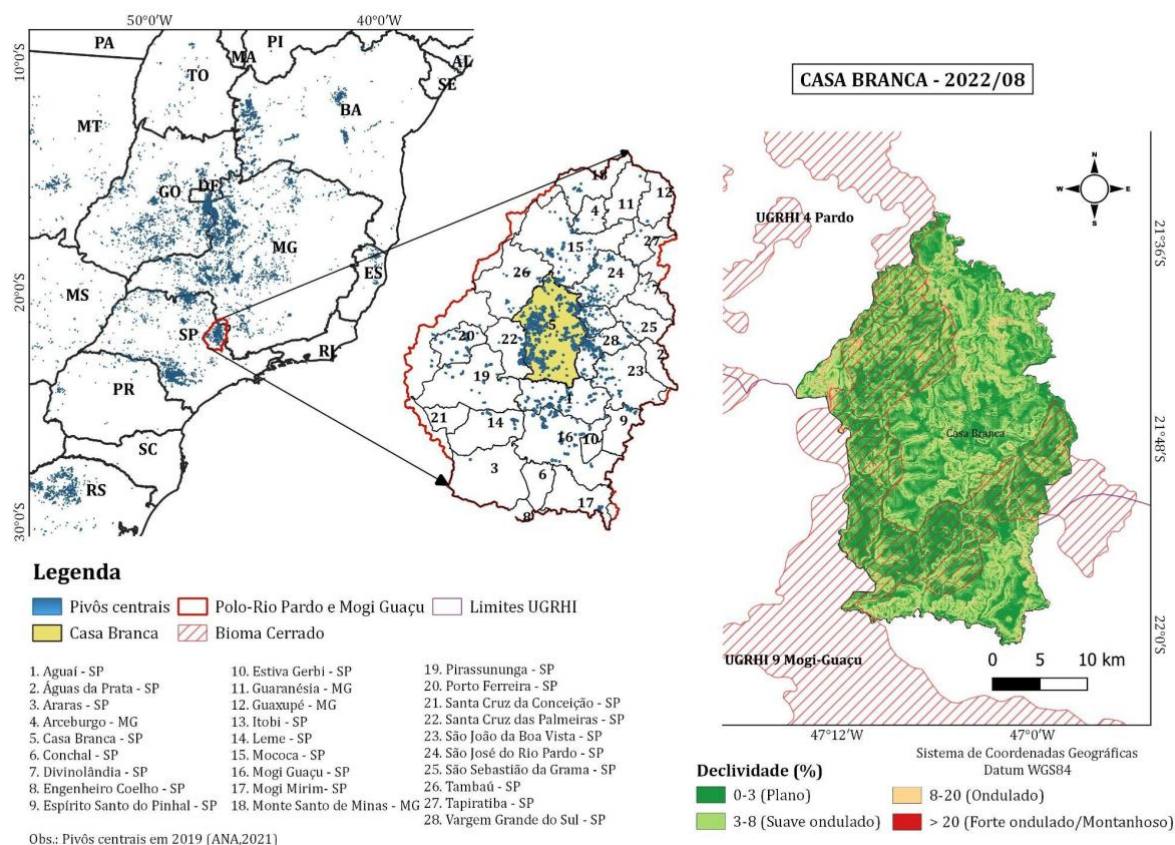


Figura 1. Mapa de localização do município de Casa Branca (SP) e do polo de irrigação Vertentes do Rio Pardo e Mogi-Guaçu (PRPMG). (*) Municípios com mais de 50% da sua área total no PRPMG. Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA) para pivôs centrais e delimitação do PRPMG; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para limites territoriais; e Copernicus DEM GLO-30 (Google Earth Engine) para mapa de declividade.

Embora encontre-se no limite de duas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs), Casa Branca faz parte da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo (UGRHI 4), no contexto da Bacia do Paraná. A UGRHI 4, localizada no nordeste do Estado de São Paulo, abrange 23 municípios, drenando uma área de aproximadamente 8.993 km², a partir de tributários das margens direita do rio Pardo, além dos rios Canoas, Fartura, Verde e Tambaú, e está sobre área dos aquíferos da Serra Geral, Guarani, Tubarão e Pré-Cambriano (Comitê, 2016).

Casa Branca é um dos principais municípios do Polo Nacional de Irrigação Vertentes do Rio Pardo e Mogi Guaçu (PRPMG), um dos 12 polos de agricultura irrigada por pivôs centrais localizados no Cerrado brasileiro, que abrange 49 municípios, sendo 7 de Minas Gerais e 42 de São Paulo, e com maior perspectiva de expansão entre os polos consolidados (ANA, 2021). A Figura 1 ilustra a delimitação do PRPMG e a localização de Casa Branca neste polo. Para realizar as análises, foram selecionados apenas os municípios com, pelo menos, 50% da área total dentro dos limites do PRPMG, tendo em vista que estes concentram 99,1% de todos os pivôs centrais do polo.

2.2. RELEVÂNCIA DE CASA BRANCA PARA A AGRICULTURA IRRIGADA

Neste primeiro tópico, o objetivo foi realizar um breve retrato da expansão da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil, no PRPMG e no município de Casa Branca, entre 1985 e 2019, a partir dos mapeamentos elaborados pela ANA, em parceria com a Embrapa (ANA, 2021). Em seguida, foi verificada a relevância do município de Casa Branca no contexto da agricultura irrigada, em escala regional e nacional, considerando *rankings* elaborados a partir de dados referentes ao número de equipamentos e à área total ocupada por pivôs centrais. Finalmente, avaliou-se a variação do tamanho médio dos equipamentos dos SIPCs do município em relação ao contexto nacional e regional.

2.3. AVANÇO DOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔS CENTRAIS E IMPLICAÇÕES PARA A DINÂMICA DA PAISAGEM DE CASA BRANCA

Para analisar como a expansão dos pivôs centrais impactou a dinâmica da paisagem do município de Casa Branca, os dados do Projeto MapBiomias (MapBiomias, 2023) foram utilizados para compreender os processos de transição e conversão de tipos de uso e cobertura da terra, inclusive aqueles que abriram espaço para a consolidação da agricultura irrigada no município. Adicionalmente, foram analisados os dados das safras de 1995-1996, 2007-2008 e 2016-2017 obtidos pelo Levantamento Censitário das Unidades de Produção Agropecuária do Estado de São Paulo (LUPA), para avaliar como a consolidação da agricultura irrigada impactou as Unidades de Produção Agropecuária (UPAs) do município, em número e dimensão. É importante ressaltar que as análises envolvendo dados do LUPA não consideram municípios mineiros do PRPMG.

2.4. DINÂMICA DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA DE CASA BRANCA NO CONTEXTO DE EXPANSÃO DA AGRICULTURA IRRIGADA

Nessa etapa, analisou-se a dinâmica de produção agrícola no município de Casa Branca do ponto de vista quantitativo e qualitativo, considerando, como ‘pano de fundo’, o avanço da agricultura irrigada. Inicialmente, o mapeamento elaborado pela ANA (2021) foi utilizado para avaliar o avanço da área ocupada por SIPCs em relação à área agrícola do município entre 1985 e 2019. Sequencialmente, os dados censitários do LUPA (1996, 2008 e 2017) foram empregados na verificação da diversidade da produção de lavouras temporárias em Casa Branca e em 25 municípios paulistas que possuem, pelo menos 50%, da sua área no PRPMG. Para isso, foi calculado o índice de diversidade de Simpson (SDI, ou *Simpson Diversification Index*) (Equação 1) para os anos-safra de 1995-1996, 2007-2008 e 2016-2017.

$$SDI = 1 - \sum_{i=1}^S \left(\frac{A_i}{A} \right)^2 \quad (1)$$

Em que A_i é a área da i -ésima cultura; A é a área total de todas as culturas somadas; e S é o número total de culturas. O SDI varia de 0 a 1, sendo diretamente proporcional ao grau de diversificação da produção.

O SDI foi, então, categorizado para representar o grau de diversificação das lavouras temporárias dos municípios analisados, conforme divisão adotada por Sambuichi et al. (2016). Assim, SDI = 0 refere-se a municípios muito especializados; SDI > 0,00 e ≤ 0,35 indica municípios especializados; municípios com SDI > 0,35 e ≤ 0,65 são considerados diversificados; e SDI > 0,65 indica municípios muito diversificados.

Por fim, informações de 50 pivôs centrais coletadas durante visitas de campo nos meses de novembro de 2022 e junho de 2023, e registradas na plataforma AgroTag (Spinelli-Araújo et al., 2019), foram analisadas com o objetivo de caracterizar a produção dentro dos SIPCs de Casa Branca. O AgroTag¹ é um aplicativo desenvolvido pela Embrapa para coleta e armazenamento de informações georreferenciadas, por meio de dispositivos móveis, com formulários personalizados de acordo com tipo de uso ou cobertura da terra. Também permite *upload* de registros fotográficos com as correspondentes coordenadas geográficas e de dados vetoriais, em ponto ou polígono, a partir de mapas-base de alta resolução espacial.

3. Resultados

3.1. RELEVÂNCIA DE CASA BRANCA PARA A AGRICULTURA IRRIGADA

No Brasil, o número de pivôs centrais cresceu substancialmente no intervalo de 34 anos (1985-2019) (Figura 2a). Em 2019, foram registrados 24.055 pivôs no território brasileiro, um aumento superior a 6.000% em relação a 1985 (com 383 pivôs). A partir do levantamento elaborado pela ANA (2021), a nível estadual, observa-se que os equipamentos estiveram concentrados principalmente em Minas Gerais (33,7%) e São Paulo (18,2%), seguidos por Goiás (16,4%), Bahia (11,6%) e Rio Grande do Sul (8,6%) (Figura 2b). Historicamente, São Paulo vem se mostrando um polo atrativo para instalações de novos equipamentos, pois, na última década, passou a ocupar a segunda posição na lista dos estados com maior número de pivôs no Brasil, antes ocupada por Goiás (Figura 2b).

¹ Embrapa. Plataforma Agrotag. Disponível em: <https://www.agrotag.cnptia.embrapa.br>

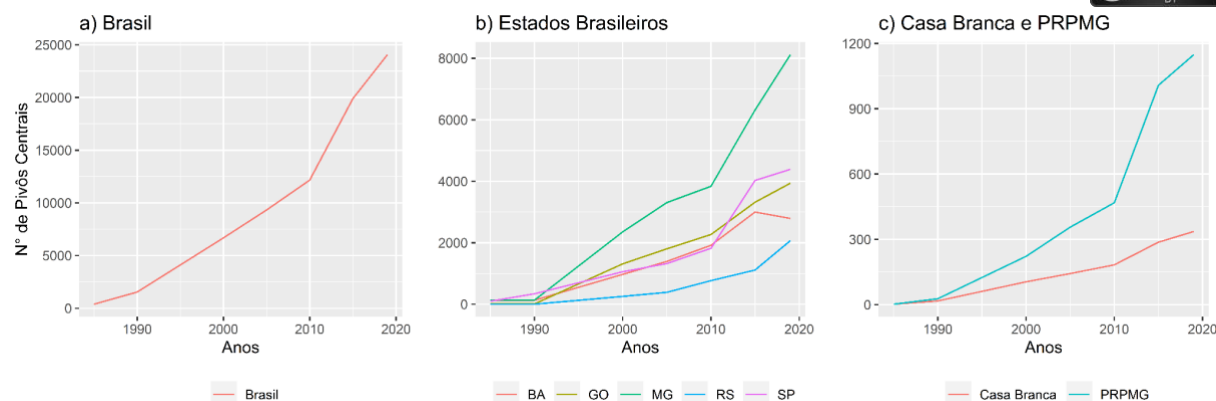


Figura 2. Evolução temporal dos pivôs centrais entre 1985 e 2019. a) Número de pivôs centrais no Brasil. b) Número de pivôs centrais nos cinco estados brasileiros com o maior número de pivôs. c) Número de pivôs centrais em Casa Branca (SP) e no polo de irrigação Vertentes do Rio Pardo e Mogi Guaçu (PRPMG).

O aumento no número de pivôs centrais em São Paulo teve reflexo direto no PRPMG, pois os SIPCs tiveram acréscimo de 1.146 equipamentos em 34 anos, isto é, uma instalação média de cerca de 34 pivôs por ano. Considerando o avanço espaço-temporal dos equipamentos no PRPMG, os resultados revelam um padrão espacial em que Casa Branca se destaca como um dos municípios centralizadores da inserção de novos SIPCs (Figura 2c). Com uma média de 10 novos pivôs instalados anualmente desde 1985, Casa Branca demonstra sua relevância e consolidação na agricultura irrigada nacional, mantendo-se consistentemente entre os 20 municípios com a maior concentração de SIPCs no Brasil ao longo de três décadas. (Tabela 1).

Tabela 1. Número total, área total (em hectares) e área relativa (em %) ocupada por pivôs centrais em Casa Branca (SP), entre 1985 e 2019. As posições que o município ocupava em relação aos outros municípios brasileiros (BR) e paulistas (SP), nos respectivos anos de estudo, estão representadas entre parênteses. A área relativa, em porcentagem, se refere à área total ocupada por pivôs em relação à área total do município.

Ano	Número de Pivôs (BR/SP)	Área total [BR/SP]	Área relativa % [BR/SP]
1985	2 (40º/9º)	166 (36º/1º)	0,2% (36º/14º)
1990	17 (14º/4º)	1.199 (23º/5º)	1,4% (10º/4º)
2000	105 (8º/2º)	6.688 (11º/2º)	7,7% (1º/1º)
2005	143 (9º/2º)	8.202 (13º/2º)	9,5% (2º/1º)
2010	183 (9º/2º)	8.970 / (14º/2º)	10,4% (4º/1º)
2015	287 (10º/4º)	12.141 (16º/4º)	14,0% (1º/1º)
2019	336 (8º/2º)	13.457 (19º/5º)	15,6% / (2º/2º)

A Figura 3 ilustra a expansão dos pivôs centrais sobre o PRPMG e Casa Branca entre 1985 e 2019, exibindo a evidente relevância do município para a agricultura irrigada da região. Apesar da constatação de aumento no número de pivôs nas escalas nacional, regional e local, a área média dos equipamentos apresentou um decréscimo substancial, passando de aproximadamente 80 hectares em 1980, para aproximadamente 40 hectares em 2020 (Figura 4). Isso sugere que, nas últimas décadas, houve uma mudança no perfil produtivo, uma vez que o tamanho dos equipamentos está relacionado ao tamanho médio das unidades produtivas (Landau & Guimarães, 2014), indicando a ‘popularização’ da tecnologia.

3.2. AVANÇO DOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔS CENTRAIS E IMPLICAÇÕES PARA A DINÂMICA DA PAISAGEM DE CASA BRANCA

Os dados do LUPA (1996, 2008 e 2017) revelam que o município de Casa Branca apresenta, historicamente, uma agricultura diversificada. Entre 1995 e 2017, houve significativa expansão da área plantada com lavouras anuais (+49%), além de aumento do cultivo de lavouras perenes (+18%) e redução expressiva das áreas destinadas às pastagens (-69%). O censo agropecuário estadual de 2016-2017 (LUPA, 2017) revelou que 83,4% do município destinava-se às atividades de agricultura e pecuária. Atualmente, predominam o cultivo de lavouras temporárias (58,0% da área agrícola total), lavouras perenes (25,2%), silvicultura (9,1%) e pastagens (7,5%).

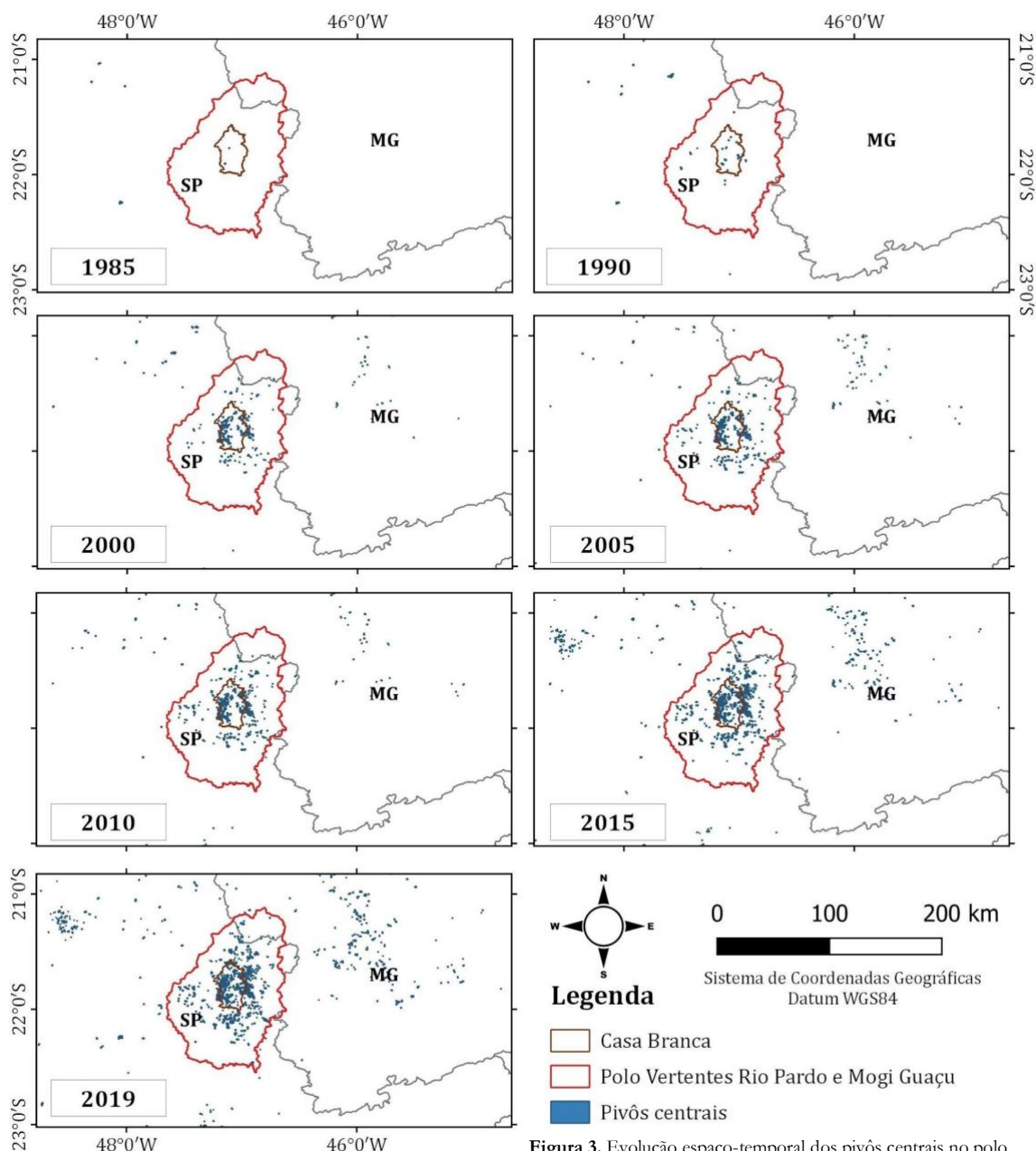


Figura 3. Evolução espaço-temporal dos pivôs centrais no polo de irrigação Vertentes do Rio Pardo e Mogi Guaçu (PRPMG) no período 1985-2019.

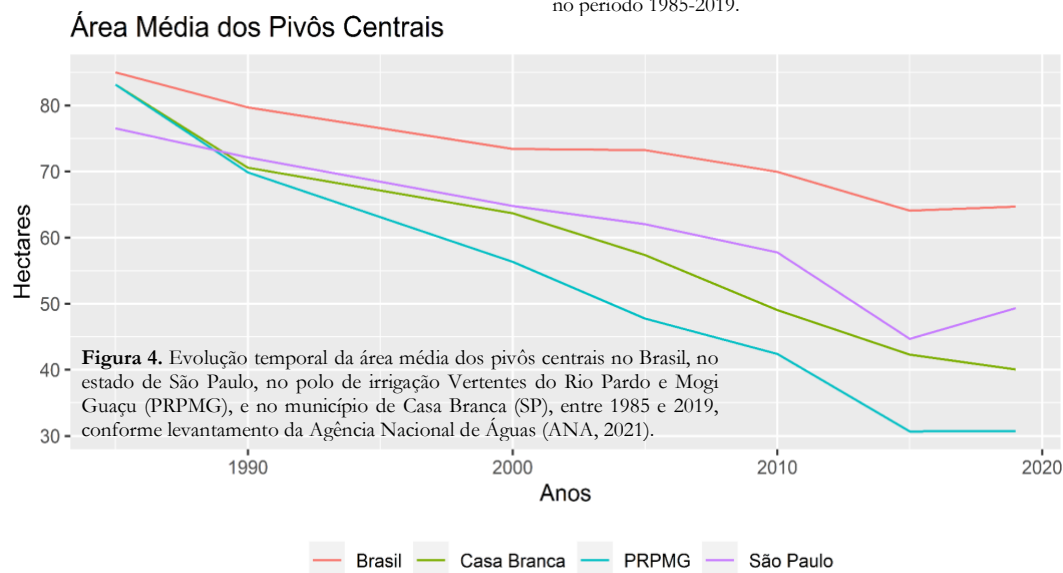


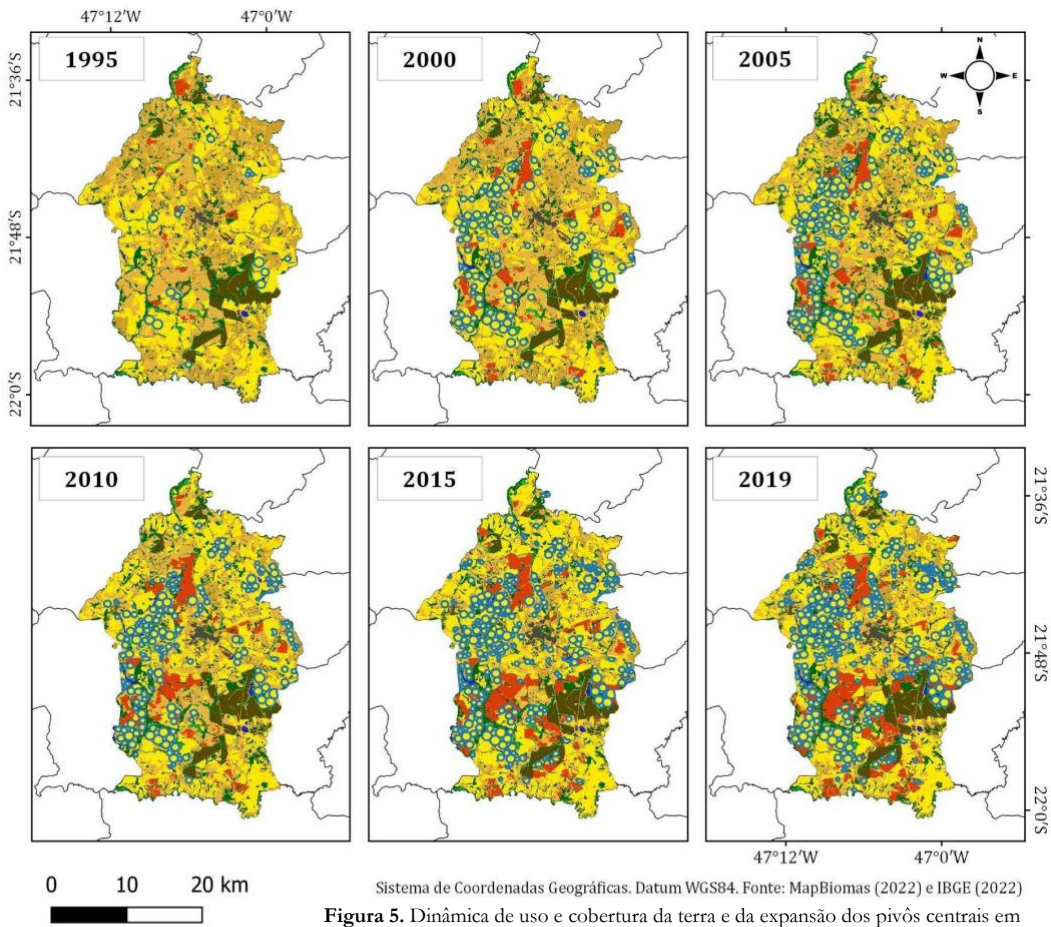
Figura 4. Evolução temporal da área média dos pivôs centrais no Brasil, no estado de São Paulo, no polo de irrigação Vertentes do Rio Pardo e Mogi Guaçu (PRPMG), e no município de Casa Branca (SP), entre 1985 e 2019, conforme levantamento da Agência Nacional de Águas (ANA, 2021).



Os dados do Projeto MapBiomias corroboram com os levantamentos censitários, confirmando o avanço e consolidação das lavouras temporárias e perenes, essencialmente sobre áreas de pastagens e mosaicos de usos (*pixels* com mistura de agricultura e pastagens), as quais perderam áreas de 10.119 hectares e 10.356 hectares, respectivamente (Tabela 2). Assim como indicado nos dados do LUPA, os mapas do MapBiomias também confirmam que, embora tenha ocorrido forte expansão agrícola no município de Casa Branca, a vegetação nativa não foi afetada de forma significativa por esse movimento, apresentando estabilidade nas últimas três décadas, como mostram as Figuras 5 e 6 e a Tabela 2. A agricultura irrigada por pivôs centrais se consolidou sobre áreas anteriormente destinadas à agropecuária. Entre 1995 e 2019, a expansão e instalação de novos SIPCs ocorreu majoritariamente sobre lavouras temporárias de sequeiro, mosaico de usos e pastagens.

Tabela 2. Área total ocupada por cada classe de uso e cobertura da terra nos mapeamentos do Projeto MapBiomias (2023) em Casa Branca (SP), em 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019.

Classe	1995	2000	2005	2010	2015	2019
Formação natural florestal	9.986	9.814	11.451	11.288	10.375	10.331
Formações naturais não-florestais	1.164	1.325	1.187	1.208	1.255	1.215
Pastagens	12.162	7.856	4.863	3.045	2.392	2.043
Lavouras temporárias	25.438	27.973	30.456	33.090	37.088	37.237
Lavouras perenes	1.147	4.019	4.333	5.359	8.183	8.661
Silvicultura	4.115	4.157	4.282	4.444	4.496	4.591
Mosaico de usos	31.222	30.075	28.460	26.545	21.189	20.866
Áreas não vegetadas	636	764	896	900	954	995
Corpos hídricos	880	766	822	872	818	809



Sistema de Coordenadas Geográficas. Datum WGS84. Fonte: MapBiomias (2022) e IBGE (2022)
Figura 5. Dinâmica de uso e cobertura da terra e da expansão dos pivôs centrais em Casa Branca, (SP), entre 1995 e 2019. Fonte: MapBiomias (2023) e ANA (2021).

Legenda

- Formações florestais

Formações não florestais

Pastagens
- Lavouras temporárias

Lavouras perenes

Silvicultura

Mosaicos de uso
- Áreas não-vegetadas

Corpos hídricos

Pivôs centrais

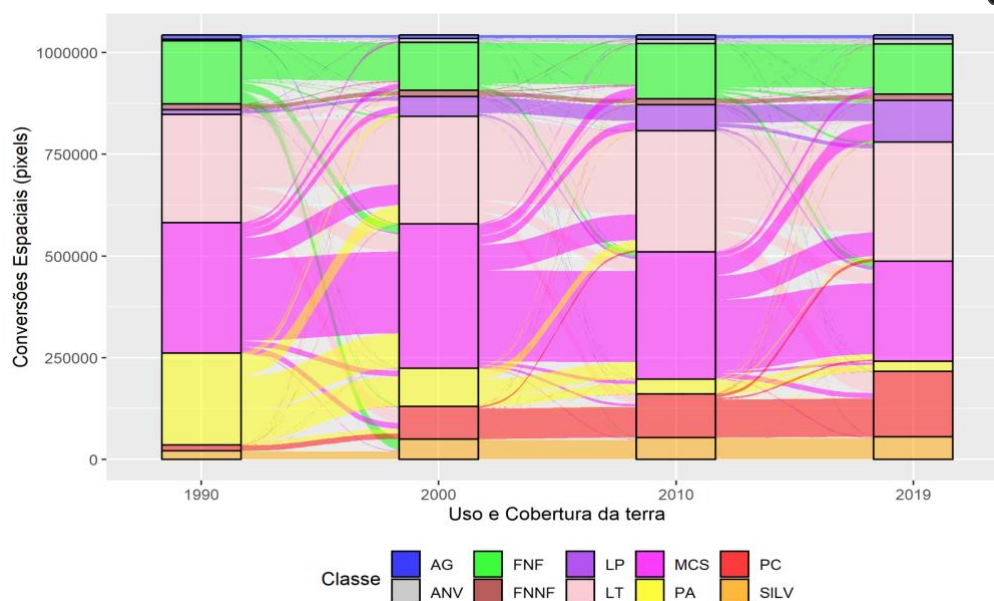


Figura 6. Diagrama de *Sankey* representando as mudanças de uso e cobertura da terra no município de Casa Branca (SP), entre 1990 e 2019, considerando as classes água (AG), áreas não vegetadas (ANV), formações naturais florestais (FNF), formações naturais não florestais (FNNF), lavouras perenes (LP), lavouras temporárias (LT), mosaicos de uso (MCS), pivôs centrais (PC) e silvicultura (SILV).

No que diz respeito às Unidades de Produção Agropecuária (UPAs), de modo geral, os dados do LUPA indicaram um acréscimo de 30% no número total de estabelecimentos no período, isto é, 749 para 974. O tamanho médio das UPAs foi pouco impactado, variando de 498 hectares para 585 hectares (aumento de ~17%) nas últimas três décadas. Considerando apenas as lavouras temporárias, o número de UPAs passou de 506 em 1995-1996 para 602 em 2016-2017, representando um aumento de 18% no período. Nessas UPAs, a área média destinada à produção de lavouras temporárias passou de 60 hectares para 69 hectares no período. Os resultados também mostraram que, entre 1995 e 2017, houve tendência de desconcentração das terras no município, pois houve um aumento de propriedades menores que 50 hectares, um declínio no número de propriedades superiores a 50 hectares e um decréscimo de proporção territorial de propriedades com área acima de 1.000 hectares (Figura 7).

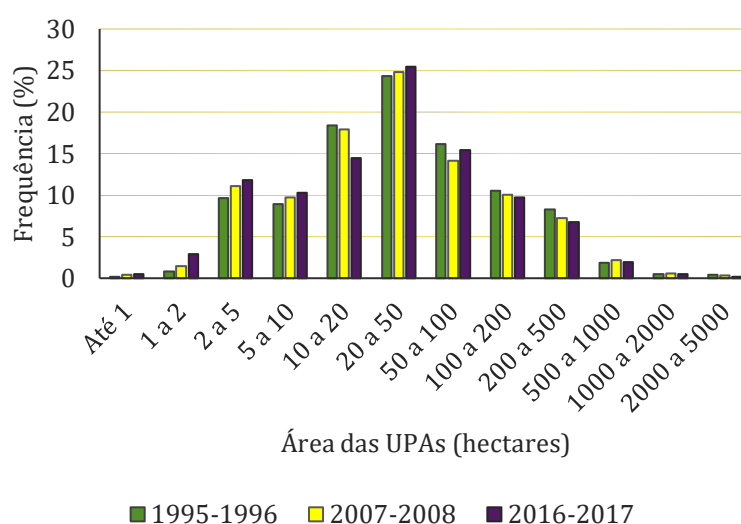


Figura 7. Distribuição da frequência das Unidades de Produção Agropecuária (UPAs) do município de Casa Branca (SP), entre os períodos de 1995-1996, 2007-2008 e 2016-2017, conforme LUPA (2018).

3.3. DINÂMICA DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA DE CASA BRANCA NO CONTEXTO DE EXPANSÃO DA AGRICULTURA IRRIGADA

Considerando a dinâmica agrícola do município, os resultados do LUPA e do MapBiomias indicaram que não houve abertura de novas áreas agrícolas nas últimas três décadas, mantendo a estabilidade da vegetação natural.

Contudo, houve incremento de 49% das lavouras temporárias, conduzindo Casa Branca ao posto de segundo município com maior área plantada no PRPMG.

Em geral, nos últimos 30 anos, a agricultura de Casa Branca passou por um importante processo de diversificação. Entre 1995-1996 (LUPA, 1996), foram identificados cultivos de 11 tipos de culturas anuais. Em uma área de 31.690 hectares, 40,4% da produção correspondeu ao milho, 28,8% de cana-de-açúcar, com menor participação do algodão (11,6%), batata-inglesa (6,4%), soja (5,2%), feijão (4,3%) e os demais cultivos (3,3%). Na safra 2007-2008, constatou-se aumento no número de cultivos, isto é, 29 culturas em 43.015 hectares. Apenas cinco dessas lavouras foram cultivadas em áreas superiores a 1.000 hectares e, juntas, representavam 98% da área total cultivada, sendo a cana-de-açúcar (52%), milho (29%), feijão (7%), batata-inglesa (6%) e soja (4%). Os demais 2%, estavam distribuídos entre 24 culturas, principalmente sorgo, mandioca, girassol e cebola (LUPA, 2008).

Em 2016-2017, a tendência de aumento do número de cultivos foi mantida, com 33 tipos de lavouras temporárias cultivadas em 55.160 hectares, considerando as três safras (LUPA, 2017). Embora a produção tenha permanecido elevada nas culturas de cana-de-açúcar (40%) e milho (29%), houve maior participação da batata-inglesa (9,5%), soja (9,4%) e feijão (8,8%). Além disso, a redução da participação da cana-de-açúcar foi acompanhada de um aumento expressivo na produção de olerícolas, principalmente a beterraba (875% em termos de área plantada), cebola (253%), além de mandioca (140%) e sorgo (25%), lavouras essas que são cultivadas principalmente sob SIPCs.

Tabela 3. Área total, em hectares, das principais lavouras temporárias do município de Casa Branca (SP), baseada nos censos agrícolas estaduais de 1995-1996, 2007-2008 e 2016-2017. Fonte: LUPA (1996, 2008, 2018).

Cultura	1995-1996	2007-2008	2016-2017
Cana-de-açúcar	9.142	22.189	22.077
Milho	12.800	12.159	15.860
Batata-inglesa	2.022	2.633	5.236
Soja	1.637	1.801	5.199
Feijão	1.372	3.063	4.886
Sorgo	121	472	559
Cebola	-	91	426
Mandioca	-	133	320
Beterraba	-	14	143
Trigo	-	-	120
Jiló	-	35	81
Berinjela	-	20	64
Quiabo	-	25	61
Algodão	3.686	-	-
Arroz	234	-	-
Aveia	243	-	-

A diversificação agrícola está diretamente relacionada à maior resiliência econômica, uma vez que a especialização gera vulnerabilidade frente às oscilações de mercado (Parré & Chagas, 2022). Além disso, a diversidade de cultivos torna os solos mais ricos em micro-organismos e com maior capacidade de retenção e armazenamento de água, tornando as lavouras mais resistentes a eventos de seca, entre outros benefícios (Shah et al., 2021).

A partir do Índice de Diversidade de Simpson (SDI) para dados de produção de lavouras temporárias, constatou-se que, desde o primeiro censo agrícola, há três décadas, Casa Branca apresentava perfil de diversificação agrícola, com um SDI de 0,73, quinto maior coeficiente entre os 28 municípios paulistas com pelo menos 50% da área no PRPMG. Em 2007-2008, embora tenha registrado uma queda no SDI (0,64), manteve-se em quarto entre os municípios analisados. Já entre 2016 e 2017, apresentou o terceiro maior nível de diversificação agrícola, com SDI de 0,73 (Tabela 4). É importante ressaltar que o SDI foi calculado considerando apenas cultivos anuais (temporários e semi-perenes), uma vez que predomina, nos pivôs centrais do município, a produção desse tipo de lavoura.

No PRPMG, o SDI médio para lavouras temporárias variou de 0,49 a 0,59 entre 1996 e 2017. Em geral, nas últimas três décadas, a diversificação foi menor em 17 dos 25 municípios do PRPMG avaliados, e a variação média do índice foi de -8,86%. Essa queda se deu principalmente entre 1996 e 2008, quando a variação média foi de -14,96%, enquanto no período de 2008 a 2017, foi observado um aumento de diversidade de 6,95% (Figura 8).

Tabela 4. Lista com os 10 municípios de maior Índice de Diversidade de Simpson (SDI) para lavouras temporárias no Polo de irrigação das Vertentes do Rio Pardo e Mogi Guaçu (PRPMG) nos calendários agrícolas de 1995-1996, 2007-2008 e 2016-2017.

	Município	1995 1996	Município	2007 2008	Município	2016 2017
1º	Itobi	0,781	Divinolândia	0,784	Itobi	0,791
2º	Mogi Mirim	0,750	Itobi	0,764	Divinolândia	0,767
3º	Vargem Grande do Sul	0,747	São Sebastião da Gramma	0,657	Casa Branca	0,731
4º	Aguaí	0,736	Casa Branca	0,641	Conchal	0,722
5º	Casa Branca	0,730	Santa Cruz do Rio Pardo	0,633	Vargem Grande do Sul	0,699
6º	Engenheiro Coelho	0,715	Engenheiro Coelho	0,625	São Sebastião da Gramma	0,691
7º	Divinolândia	0,701	Mogi Mirim	0,612	Santa Cruz do Rio Pardo	0,673
8º	Santa Cruz do Rio Pardo	0,692	Águas da Prata	0,599	Engenheiro Coelho	0,644
9º	Santa Cruz da Conceição	0,673	Vargem Grande do Sul	0,591	Mogi Mirim	0,640
10º	Estiva Gerbi	0,662	Conchal	0,564	Mogi Guaçu	0,616

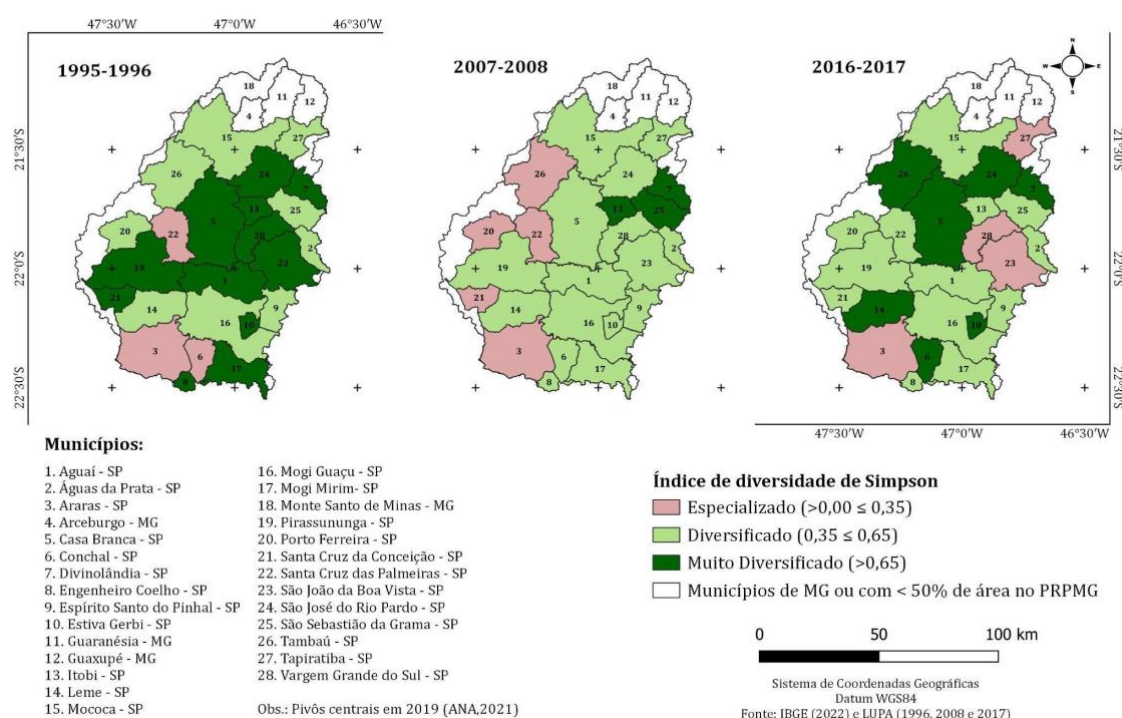


Figura 8. Dinâmica espaço-temporal do Índice de Diversidade de Simpson (SDI) para lavouras temporárias nos municípios analisados do polo de irrigação Vertentes do Rio Pardo e Mogi Guaçu (PRPMG), conforme dados dos censos agrícolas estaduais de 1995-1996, 2007-2008, 2016-2017. Fonte: LUPA (1996; 2008; 2017).

Como apresentado na Figura 8, embora tenha havido uma tendência de redução no nível de diversificação das lavouras temporárias entre os municípios analisados no PRPMG, em 2016-2017, apenas quatro municípios apresentaram agricultura especializada: Araras, Tapiratiba, São João da Boa Vista e Vargem Grande do Sul, onde a cana-de-açúcar ocupava 88%, 79%, 63% e 47%, respectivamente. Com exceção de Vargem Grande do Sul, que apresentou a terceira maior proporção de área do município ocupada por pivôs centrais no PRPMG, os três demais possuem menos de 3% da sua área ocupada com SIPCs.

A Figura 5, exibida na seção anterior, revelou que os pivôs centrais em Casa Branca têm sido historicamente destinados à produção de lavouras temporárias. Com o objetivo de caracterizar a agricultura irrigada por SIPCs, foram obtidas informações em campo de cinquenta pivôs centrais em 28 e 29 novembro de 2022 (no curso da primeira safra), e 26 de junho de 2023 (final da segunda e início da terceira safra de 2022/2023). A Figura 9 ilustra as principais culturas identificadas nos pivôs centrais analisados em campo. Considerando ~15% dos pivôs do município, houve um predomínio do cultivo de soja e milho na primeira safra (Tabela 5). Na segunda safra, as culturas apresentaram-se bem mais diversificadas, predominando os cultivos de batata-inglesa, milho, sorgo, beterraba, cebola e feijão, dentre outras. De maneira geral, a ANA (2021) indicou que a taxa de ocupação de pivôs centrais fica entre 30% e 40% entre julho e setembro, que corresponde ao período seco, quando são

cultivadas as lavouras de terceira safra, porque há baixa disponibilidade hídrica e os custos para operação dos equipamentos são elevados.

Tabela 5. Cultivos agrícolas observados em pivôs centrais no município de Casa Branca (SP) entre 28 e 29 de novembro de 2022 e 26 de junho de 2023.

Data	Safra	Cultura	Observações
Novembro de 2022	1a	Soja	36 (77%)
		Milho	9 (19%)
		Amendoim	1 (2%)
		Mandioca*	1 (2%)
Junho de 2023	2a	Batata-inglesa	13 (26%)
		Milho	11 (22%)
		Sorgo	8 (16%)
		Beterraba	7 (14%)
		Cebola	4 (8%)
		Feijão	3 (6%)
		Trigo	2 (4%)
		Cenoura	1 (2%)
		Mandioca*	1 (2%)

* A mandioca é um cultivo semi-perene.

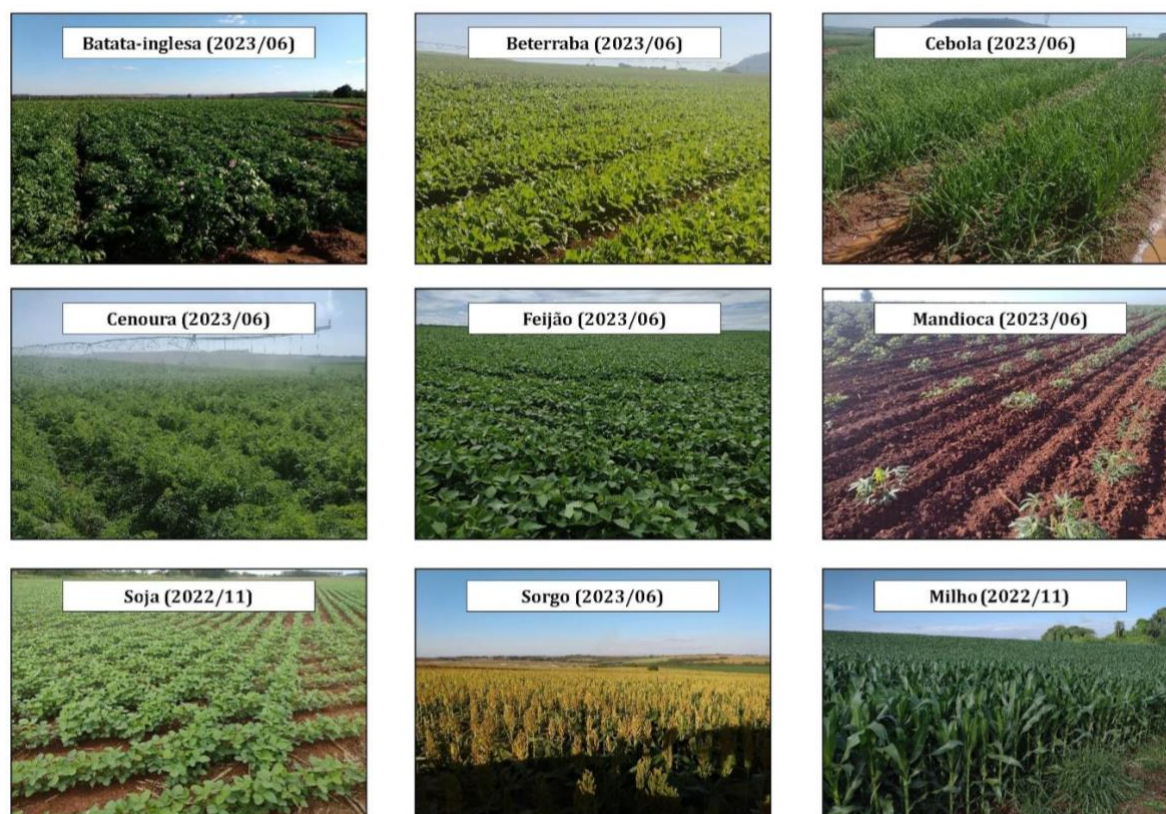


Figura 9. Fotografias georreferenciadas e adquiridas com o aplicativo AgroTag em visitas de campo durante o desenvolvimento da primeira e segunda safras no município de Casa Branca (SP), entre 28 e 29 de novembro de 2022 e 26 junho de 2023, respectivamente.

4. Discussão

4.1. RELEVÂNCIA DO MONITORAMENTO DE ÁREAS IRRIGADAS POR PIVÔS CENTRAIS

Conforme mencionado anteriormente, essas informações foram adquiridas com auxílio do aplicativo AgroTag (Spinelli-Araújo et al., 2019) no âmbito do projeto Mapeamento Agropecuário no Cerrado via Combinação de Imagens Multisensores (MULTICER²), que objetivou desenvolver metodologias de mapeamento agropecuário

² MultiCER. Projeto desenvolvido em parceria entre Embrapa, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), financiado pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

do Cerrado brasileiro por meio de uso de dados de múltiplas fontes (multisensor e multisatélite), como o *Harmonized Landsat Sentinel-2* (HLS) (Claverie et al., 2018) e o *Planet.Scope* (Planet Labs Inc.), e técnicas de aprendizado de máquina, sempre com auxílio do AgroTag no levantamento de amostras de campo. Alguns dos resultados do projeto podem ser encontrados em Parreiras et al. (2022), Sano et al. (2023) e Bolfe et al. (2023).

O município de Casa Branca é uma das áreas de estudo do projeto devido à elevada diversidade agrícola e ao grande número de pivôs centrais, características que são desafiadoras para o mapeamento e monitoramento com sensoriamento remoto. Portanto, visitas regulares para coleta de dados e informações amostrais têm sido realizadas no município entre maio de 2022 e agosto de 2023. Estratégias de mapeamento detalhado e preciso da atividade agrícola estão em processo de desenvolvimento. A Figura 9 traz imagens obtidas com o aplicativo AgroTag durante as visitas de campo em Casa Branca em novembro de 2022 e junho de 2023, ilustrando os principais tipos de culturas encontradas nos pivôs centrais do município

Embora as práticas de manejo também sejam muito relevantes, a eficiência do uso da água está diretamente ligada aos métodos e sistemas de irrigação. O pivô central se tornou um dos principais sistemas de irrigação no Brasil e líder em agricultura mecanizada (ANA, 2021) por ser altamente eficiente, adaptável a diferentes condições ambientais, automatizado, e pela possibilidade de ser empregado de forma integrada para aplicação de fertilizantes e defensivos.

No bioma Cerrado, a expansão agrícola por pivôs centrais tem mostrado impactos ambientais substanciais, essencialmente a tendência de conversão de áreas de vegetação nativa (Ferreira et al., 2021). Contudo, em Casa Branca, nos últimos 30 anos, não foi encontrado esse comportamento. A vegetação apresentou ganho em extensão territorial, como foi indicado tanto pelos dados do LUPA, quanto pelo MapBiomias. Estudos prévios indicam que a estabilidade da vegetação é fundamental para a manutenção dos níveis de biodiversidade, proteção dos solos quanto à intensidade das erosões e controle hidroclimático (Ratter, Ribeiro & Bridgwater, 1997; Grecchi et al., 2014).

Constatou-se ainda que a modernização da agricultura pela expansão dos pivôs centrais não resultou em especialização, mas foi mantida a elevada diversificação agrícola, havendo ainda, incremento no número de culturas cultivadas, com maior participação de olerícolas (Tabelas 4 e 5). Essa diversidade se reflete em diversos eixos, tais como a segurança alimentar, garantindo o fornecimento de porções nutricionais de famílias, geração de renda e acessibilidade para pequenos agricultores, além do contexto ambiental, com o aumento de níveis de matéria orgânica no solo e nutrientes, conduzindo ao aumento da fertilidade desses ambientes.

Em contrapartida, a expansão da agricultura irrigada implica em impactos ambientais significativos, como maior emissão de gases de efeito estufa (GEE) pelo consumo de energia, preparo do solo e pela maior demanda por fertilizantes e defensivos (Maraseni & Cockfield, 2012; Cardozo et al., 2016). Casa Branca registrou avanços na ordem de 10 pivôs por ano desde 1985, elevando a demanda de recursos hídricos no município, que apresenta o maior consumo de águas superficiais em toda a UGRHI-4, cerca de 26% dos recursos da bacia (Comitê, 2016). Adicionalmente, impactos no contexto hídrico podem intensificar conflitos sociais na área de estudo, uma vez que, nos últimos anos, esses conflitos foram amplificados no Cerrado (CPT, 2022).

Dessa forma, informações acerca da dinâmica espaço-temporal dos pivôs são fundamentais do ponto de vista econômico, social e ambiental (Albuquerque et al., 2020). Essas informações são indispensáveis para a funcionalidade dos instrumentos de controle e gestão da água e que, por sua vez, são fundamentais para uma agricultura mais sustentável, principalmente no Cerrado, considerando-se os estudos que mostram que, até 2050, o bioma pode perder um terço de suas águas (Salmona et al., 2023).

No contexto dos acordos internacionais de combate às mudanças climáticas e no âmbito do Programa de Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC), surge o conceito de MRV (Mensuração, Reportagem/Relato e Verificação), que engloba ferramentas para acompanhamento e avaliação da redução das emissões de GEE, nas quais o sensoriamento remoto assume papel relevante, principalmente na coleta e verificação indireta de informações sobre sistemas e práticas agrícolas (Perosa et al., 2019).

O censo agrícola realizado pelo LUPA é abrangente e detalhado, contudo, suas informações não possuem referência espacial a nível de talhão, com disponibilidade no intervalo de 10 anos. Por outro lado, tem-se a pesquisa de Produção Agrícola Municipal (PAM), com dados anuais. No entanto, esses produtos são auto declaratórios e apresentam limitação quanto às culturas levantadas, além de não abordarem práticas agrícolas. Portanto, é relevante que a produção da informação seja espacializada, para contribuir não apenas com o

monitoramento da produção agrícola, mas também com a avaliação dos impactos ambientais associados aos SIPCs, planejamento e gestão do uso da água, uma vez que as estimativas de demanda hídrica dependem de informações precisas das áreas irrigadas (ANA, 2021).

4.2. PAPEL DO SENSORIAMENTO REMOTO NA DETECÇÃO E MAPEAMENTO DE PIVÔS CENTRAIS

A ANA, em parceria com a Conab e Embrapa, faz o levantamento periódico dos pivôs centrais, utilizando ferramentas e técnicas de sensoriamento remoto. Esse levantamento corresponde a uma importante estratégia para subsidiar o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), instrumento da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei Federal nº 9.433/1997), fornecendo dados e informações essenciais para o planejamento, gestão e avaliação de riscos hídricos (ANA, 2021).

Em geral, o mapeamento dos pivôs, realizado pela ANA (2021), ocorre por meio de fotointerpretação e vetorização em tela. Contudo, esse processo requer tempo, recursos e profissionais altamente capacitados (Ozdogan et al., 2010). Considerando a demanda por informações rápidas e cada vez mais automatizadas, o avanço em técnicas de sensoriamento remoto e tecnologias de informação espacial, como desenvolvimento de algoritmos robustos, plataformas de processamento de dados (exemplo, *Google Earth Engine*) e o melhoramento de resoluções espaciais, temporais e radiométricas, podem auxiliar no mapeamento dos SIPCs (Albuquerque et al., 2020; Khanal et al., 2020). Além de variações relacionadas ao tamanho e à forma, os pivôs centrais apresentam alta variabilidade interna de culturas e número de safras, representando um desafio para o seu monitoramento via sensoriamento remoto (Albuquerque et al., 2020; Carvalho et al., 2021).

Os SIPCs apresentam particularidades que tornam difícil a sua detecção por meio de classificação baseada em aprendizado de máquina e informações espectrais. Assim, as redes neurais convolucionais (RNN), baseadas em aprendizado profundo (*deep learning*, ou DL), têm se apresentado como alternativa para automatização (Saraiva et al., 2020; Carvalho et al., 2021). Duas técnicas baseadas em DL têm se destacado nos estudos realizados no Cerrado brasileiro nos últimos anos, a segmentação semântica (Albuquerque et al., 2020; Saraiva et al., 2020) e a segmentação de instâncias (Albuquerque et al., 2021; Carvalho et al., 2021).

A segmentação semântica é uma abordagem “*class-aware*” que analisa categorias, localização e forma, classificando os *pixels* conforme a interação e possibilidades de agrupamento semântico, considerando também cores, texturas e padrões. Os métodos de segmentação de instâncias, por outro lado, visam a separação dos objetos, possibilitando a contagem de indivíduos e estimativas individualizadas de áreas, informações fundamentais para previsões de colheita e uso da água, sendo considerados uma evolução em relação à segmentação semântica (Carvalho et al., 2021). A Figura 10 ilustra exemplos resultantes de mapeamentos automáticos de pivôs centrais com segmentação semântica e de instâncias.

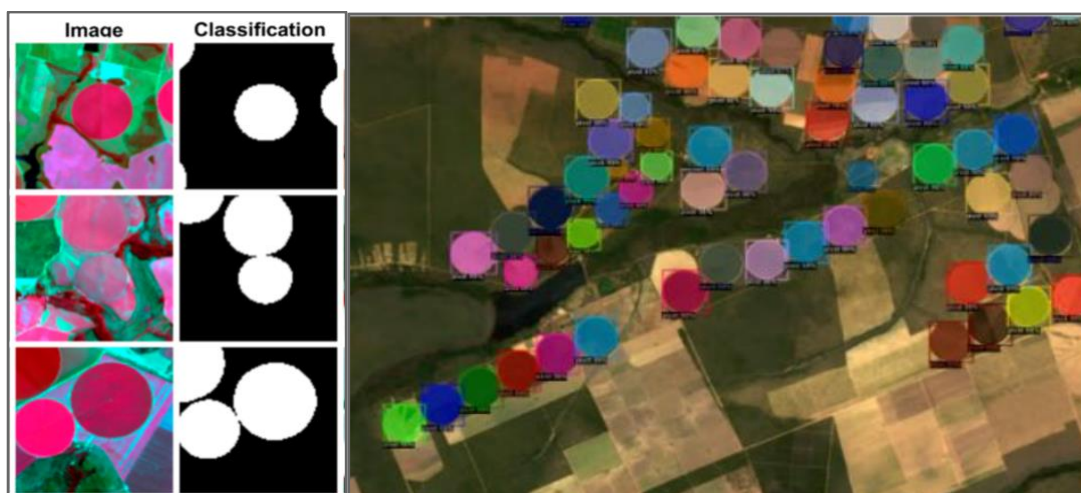


Figura 10. Exemplos de mapeamento automatizado de pivôs centrais com redes neurais baseadas em Deep Learning. À esquerda, mapeamento realizado por Albuquerque et al. (2020) com segmentação semântica a partir da rede neural U-Net e, à direita, mapeamento realizado por Carvalho et al. (2021), com algoritmo Mask-RCNN para segmentação de instâncias, ambos realizados na região Centro-Oeste do Brasil, no Bioma Cerrado.

A classificação orientada ao objeto, a partir dessas técnicas, foi realizada com conjuntos de imagens multiespectrais de resoluções espaciais variadas, como PlanetScope (Saraiva et al., 2021), de alta resolução espacial e temporal, e Landsat *Operational Land Imager* (OLI) (Albuquerque et al., 2020; Albuquerque et al.,

2021; Carvalho et al., 2021), de média resolução, com medianas mensais ou apenas uma imagem por período (seco e chuvoso), não sendo necessárias longas séries temporais. Os autores revelaram que a classificação automatizada de pivôs centrais com DL é uma estratégia possível e promissora, com altos níveis de acurácia (> 85%), indicando que o mapeamento e monitoramento dos SIPCs, ao longo do tempo, possa ser realizado com maior periodicidade, em tempo quase-real, e envolvendo menores custos, favorecendo toda a cadeia de análises relacionadas ao planejamento, gestão e manejo do uso da água dos tipos agrícolas produzidos, bem como o monitoramento dos impactos ambientais desses sistemas.

O monitoramento e mapeamento da dinâmica das culturas produzidas nos SIPCs são desafios para o sensoriamento remoto. Estima-se que ~90% dos SIPCs sejam empregados na produção de grãos e cana-de-açúcar (ANA, 2021), contudo, dados de campo mostraram padrões de diversificação agrícola em Casa Branca. De maneira geral, ambientes mais diversificados e fragmentados, como é o caso dos pivôs centrais de Casa Branca, requerem uso de densas séries temporais de índices de vegetação, capazes de captar a assinatura fenológica dos cultivos, com equilíbrio entre resolução temporal e espacial (Bendini et al., 2019).

Estratégias multisensor, como é o caso do *Harmonized Landsat Sentinel-2*, por exemplo, são diferenciais para monitoramento agrícola em regiões tropicais que apresentam elevada cobertura de nuvens, como é o caso do Cerrado. Ao integrar dados do Landsat OLI e Sentinel-2 MSI, o HLS fornece imagens de média resolução espacial (30 metros) e até 2 dias de resolução temporal (Claverie et al., 2018). Embora estejam disponíveis para aquisição em plataformas da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), como o *Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples* (AquaEEARS), ainda é escassa a aplicação desses dados no Cerrado brasileiro (Parreiras et al., 2022; Bolfe et al., 2023).

5. Considerações finais

Nas últimas décadas, a expansão dos sistemas de irrigação por pivôs centrais em Casa Branca trouxe transformações significativas que resultaram no aumento da produção agrícola e em uma paisagem dinâmica e diversificada no meio rural. No entanto, a expansão acelerada desses sistemas levanta preocupações quanto ao consumo excessivo de recursos hídricos e possíveis impactos ambientais. O uso combinado do sensoriamento remoto, geotecnologias e técnicas avançadas de processamento de dados, oferece uma abordagem promissora para o monitoramento contínuo desses sistemas, facilitando a tomada de decisões com vistas à eficiência e sustentabilidade na agricultura, com utilidade, inclusive, em sistemas de Mensuração, Reportagem/Relato e Verificação (MRV). O monitoramento mais eficiente, em especial no Cerrado, considerado pilar da agricultura nacional, tem papel importante no estabelecimento de ações para equilibrar o progresso da atividade agrícola e a preservação dos recursos naturais, a fim de garantir que os sistemas naturais e econômicos permaneçam produtivos e resilientes.

5.1. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Processo nº 2019/26222-6. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Código de Financiamento 001, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

6. Referências

- Acharya, P., Ghimire, R., Paye, W.S., Ganguli, A. C., & DelGrosso, S. J. (2022). Net greenhouse gas balance with cover crops in semi-arid irrigated cropping systems. *Scientific Reports*, 12, 12386. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16719-w>.
- Agência Nacional de Águas (ANA). (2021, fevereiro). *Atlas Irrigação 2021: Uso da Água na Agricultura Irrigada* (2ª edição). <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1b19cbb4-10fa-4be4-96db-b3dcd8975db0>.
- Agência Nacional de Águas (ANA). (2023, janeiro). *Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil*. <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/e2d38e3f-5e62-41ad-87ab-990490841073>.
- Albuquerque, A. O., Carvalho Jr., O. A., Carvalho, O. L. F., Bem, P. P., Ferreira, P. H. G., Moura, R. S., Silva, C. R. S., Gomes, R. A. T., & Guimarães, R. F. (2020). Deep semantic segmentation of center pivot irrigation systems from remotely sensed data. *Remote Sensing*, 12(13), 2159. <https://doi.org/10.3390/rs12132159>.
- Albuquerque, A. O., Carvalho, O. L. F., Silva, C. R., Bem, P. P., Gomes, R. A. T. & Borges, D. L. (2021). Instance segmentation of center pivot irrigation systems using multi-temporal SENTINEL-1 SAR images. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 12, 100537. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100537>.

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., & Spavorek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

Amaral, A. M. C., Reis, F. A. G. V., Giordano, L. C., Corrêa, C. V. S., Chaves, C. J. (2015). Compartimentação fisiográfica pela análise integrada: estudo de caso no município de Casa Branca (SP). *Geologia USP. Série Científica*, 15(1), 15-28. <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v15i1p15-28>.

Angnes, G., Diotto, A.V., Rodias, E., & Romanelli, T. L. (2023). Water and Carbon Footprints of Biomass Production Assets: Drip and Center Pivot Irrigation Systems. *Sustainability*, 15, 8199. <https://doi.org/10.3390/su15108199>.

Bendini, H. N., Fonseca, L. M. G., Schwieder, M., Körtig, T. S., Rufin, P., Sanches, I. D., Leitão, P. J., & Hostert, P. (2019). Detailed agricultural land classification in the Brazilian cerrado based on phenological information from dense satellite image time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 82, 101872, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.005>.

Bolfe, É. L., Parreiras, T. C., Silva, L. A. P. d., Sano, E. E., Bettiol, G. M., Victoria, D. d. C., Sanches, I. D., & Vicente, L. E. (2023). Mapping Agricultural Intensification in the Brazilian Savanna: A Machine Learning Approach Using Harmonized Data from Landsat Sentinel-2. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(7), 263. <https://doi.org/10.3390/ijgi12070263>.

Cardozo, N. P., Bordonal, R. C., & La Scala Jr., N. (2016). Greenhouse gas emission estimate in sugarcane irrigation in Brazil: is it possible to reduce it, and still increase crop yield? *Journal of Cleaner Production*, 112, 3988-3997. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.040>.

Carvalho, O. L., Carvalho Jr., O. A., Albuquerque, A. O., Bem, P. P., Silva, C. R., Ferreira, P. H. G., Moura, R. S. et al. (2021). Instance segmentation for large, multi-channel remote sensing imagery using Mask-RCNN and a mosaicking approach. *Remote Sensing*, 13(1), 39. <https://doi.org/10.3390/rs13010039>.

Claverie, M., Ju, J., Masek, J. G., Dungan, J. L., Vermote, E. F., Roger, J. C., Skakun, S., & Justice, C. (2018). The Landsat and Sentinel-2 Surface reflectance data set. *Remote Sensing of Environment*, 219, 145-161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.002>.

Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo. (2016). *Relatório de situação dos recursos hídricos da bacia hidrográfica*. <https://drive.google.com/drive/folders/1e4-rEh2onvUiOtuR5dUeo-cKWZkUEFJV>.

CPT – Comissão Pastoral da Terra. (2022). *Conflitos, massacres e memórias das lutadoras e lutadores do Cerrado*. <https://www.cptnacional.org.br/publicacao/category/75-publicacoes-cerrado>.

Ferreira, A. B. R., Pereira, G., Fonseca, B. M., & Silva Cardozo, F. (2021). As mudanças no uso e cobertura da terra na região oeste da Bahia a partir da expansão agrícola. *Formação*, 28(53), 389-412. <https://doi.org/10.33081/formacao.v28i53.7871>.

Grecchi, R. C., Beuchle, R., Shimabukuro, Y. E., & Seliger, R. (2014). Land use and land cover changes in the Brazilian Cerrado: A multidisciplinary approach to assess the impacts of agricultural expansion. *Applied Geography*, 55, 300-312. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.09.014>.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2023). *Cidades e Estados. Casa Branca*. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/casa-branca.html>.

Landau, D. P., & Guimarães, E. C. (2014). Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil em 2013. *Embrapa*. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/118126/1/bol-106.pdf>.

Levantamento censitário das unidades de produção agropecuária do Estado de São Paulo (LUPA). Dados consolidados municipais. (1996). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Governo do Estado de São Paulo. <https://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/dadosmunicipais9596.php>.

Levantamento censitário das unidades de produção agropecuária do Estado de São Paulo (LUPA). Dados consolidados municipais. (2008). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Governo do Estado de São Paulo. <https://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/dadosmunicipais.php>.

Levantamento censitário das unidades de produção agropecuária do Estado de São Paulo (LUPA). Dados consolidados municipais. (2017). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Governo do Estado de São Paulo. <https://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/dadosmunicipais1617.php>.

Maraseni, T. N., & Cockfield, G. (2012). *Agricultural Water Management*, 103, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.014>.

MapBiomass. Coleções MapBiomass. Coleção 8ª da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. (2023). <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>.

Ozdogan, M., Yang, Y., Allez, G., & Cervantes, C. (2010). Remote Sensing of Irrigated Agriculture: Opportunities and Challenges. *Remote Sensing*, 2(9), 2274-2304. <https://doi.org/10.3390/rs2092274>.

Parré, J. L., & Chagas, A. L. S. (2022). Determinants of agricultural diversification in Brazil: a spatial econometric analysis. *Letters in Spatial and Resource Sciences*, 15, 173-195. <https://doi.org/10.1007/s12076-021-00295-0>.

Parreiras, T. C., Bolfe, É. L., Chaves, M. E. D., Sanches, I. D., Sano, E. E., Victoria, D. d. C., Bettiol, G. M., & Vicente, L. E. (2022). Hierarchical Classification of Soybean in the Brazilian Savanna Based on Harmonized Landsat Sentinel Data. *Remote Sensing*, 14(15), 3736. <https://doi.org/10.3390/rs14153736>.

Perosa, B. B., Gurgel, A. C., Vicente, L. E., Vicente, A. K., & Spinelli-Araújo, L. (2019). Agricultura de Baixo Carbono no Brasil: potencialidade e desafios para construção de um sistema MRV. *Anais do XIII Encontro Nacional da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica*, Campinas, Brasil, 13. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1116505/1/VicenteAgriculturaCarbono2019.pdf>.

Ratter, J. A., Ribeiro, J. F., & Bridgewater, S. (1997). The Brazilian cerrado vegetation and threats to its biodiversity. *Annals of Botany*, 80(3), 223-230. <https://doi.org/10.1006/anbo.1997.0469>.

Reis, F. A. G. V., Amaral, A. M. C., Giordano, L. C., Corrêa, C. V. S., & Chaves, C. J. (2018). Mapeamento geoambiental do município de Casa Branca (SP) como subsídio ao planejamento territorial. *Geologia USP*, 18(2), 29-44. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-133330>.

Salmona, Y. B., Matricardi, E. A. T., Skole, D. L., Silva, J. F. A., Coelho Filho, O. A., Pedlowski, M. A., Sampaio, J. M., Castrillón, L. C. R., Brandão, R. A., Silva, A. L. et al. (2023). A Worrying Future for River Flows in the Brazilian Cerrado Provoked by Land Use and Climate Changes. *Sustainability* 15, 4251. <https://doi.org/10.3390/su15054251>.

Sambuichi, R. H. R., Galindo, E. P., Pereira, R. M., Constantino, M., & Rabetti, M. D. S. (2016). Diversidade da Produção nos Estabelecimentos da Agricultura Familiar no Brasil: 623 uma análise econométrica baseada no cadastro da Declaração de Aptidão ao Pronaf (DAP). In: Monasterio, L. M., Neri, M. C., & Soares, S. S. D. (Ed.). *Brasil em desenvolvimento 2014: Estado, planejamento e políticas públicas*. Ipea. https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_2202.pdf.

Sano, E. E., Bolfe, É. L., Parreiras, T. C., Bettiol, G. M., Vicente, L. E., Sanches, I. D., & Victoria, D. d. C. (2023). Estimating Double Cropping Plantations in the Brazilian Cerrado through PlanetScope Monthly Mosaics. *Land*, 12(3), 581. <https://doi.org/10.3390/land12030581>.

Saraiva, M., Protas, E., Salgado, M., & Souza, C. (2020). Automatic mapping of center pivot irrigation systems from satellite images using Deep Learning. *Remote Sensing*, 12(3), 558. <https://doi.org/10.3390/rs12030558>.

Shah, K. K., Modi, B., Pandei, H. P., Subedi, A., Aryal, G., Pandey, M., & Shrestha, J. (2021). Diversified crop rotation: an approach for sustainable agriculture production. *Advances in Agriculture*, 2021, 8924087. <https://doi.org/10.1155/2021/8924087>.

Spinelli-Araújo, L., Vicente, L. E., Manzatto, C. V., Skorupa, L. A., Victoria, D. C., & Soares, A. R. (2019). AgroTag: um sistema de coleta, análise e compartilhamento de dados de campo para qualificação do uso e cobertura das terras no Brasil. (2019). In: *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Santos SP, Brasil, 14-17 Abril 2019; INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: São José dos Campos SP, Brasil, 2019; pp. 451-454.